

**Título: Comportamiento a fatiga de asfaltos altamente modificados con caucho proveniente de neumáticos fuera de uso mediante el barrido de amplitud lineal.**  
Autores: Ignacio Zapata Ferrero, Oscar Rebollo, Gerardo Botasso, Julián Rivera. Evento: XXI CILA.

## **COMPORTAMIENTO A FATIGA DE ASFALTOS ALTAMENTE MODIFICADOS CON CAUCHO PROVENIENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO MEDIANTE EL BARRIDO DE AMPLITUD LINEAL**

Ignacio Zapata Ferrero, Oscar Rebollo, Julián Rivera, Gerardo Botasso

### **Resumen**

La resistencia a fatiga es una de las problemáticas más frecuentes y más compleja de predecir en las mezclas asfálticas. Por su carácter viscoelástico, el asfalto es el material que presenta mayor aporte a la fatiga dentro de la mezcla asfáltica. El parámetro  $G^*sen\delta$  propuesto por SUPERPAVE es el más ampliamente utilizado para la evaluación de fatiga; sin embargo, tiene sus limitaciones ya que no permite observar si la muestra está dañada, por ejemplo.

En el presente trabajo se evalúa el comportamiento de asfaltos modificados con altas tasas de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso (15 %, 20 % y 25 %) con el reómetro de corte dinámico (DSR, de su sigla en inglés) mediante el ensayo de barrido de amplitud lineal (LAS, de su sigla en inglés). Este ensayo consiste en evaluar la muestra a crecientes amplitudes oscilatorias, de forma tal de acumular el daño en la muestra, en el rango en el que se presenta la fatiga en el asfalto. Los resultados son evaluados mediante la teoría simplificada del daño continuo viscoelástico, la cual pone de manifiesto la resistencia a fatiga del asfalto, independizándola del tipo e intensidad de carga aplicada.

Los resultados del presente trabajo permiten evidenciar el beneficio de la incorporación del neumático fuera de uso como un residuo modificador del asfalto, mediante el análisis con el reómetro por medio del ensayo planteado. Por último, se confeccionan las curvas de ciclos en función de las deformaciones impuestas, las cuales permiten evidenciar una mayor resistencia a fatiga en el asfalto, con crecientes tasas de caucho de neumático fuera de uso.

**Palabras Clave:** Asfalto, Fatiga, Neumático fuera de uso, Reología

### **1 Introducción**

La fatiga en los pavimentos flexibles es una de las principales causas de reducción de la vida en servicio. La fisuración iniciada en la parte inferior de la mezcla asfáltica, es generada por llegarse a un límite del valor de la deformación específica de la capa asfáltica [1, 2]. El daño que genera la fatiga es producida por una combinación de diseño estructural del paquete utilizado, la selección de materiales intervinientes y las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Dentro de la mezcla asfáltica, el asfalto tiene un rol significativo en la falla por fatiga [3,4]. Estudios realizados por medio de la mecánica de fractura y la microsimulación indican que la fisuración por fatiga se propaga inicialmente por el ligante asfáltico, pasando luego a la matriz de la mezcla.

### **2 Marco teórico**

Las metodologías propuestas por SHRP (Strategic Highway Research Program), como lo es la evaluación del grado PG para la clasificación de asfaltos, fueron útiles en los años 1990, pero

actualmente los avances en los estudios muestran que varios criterios no reflejan la realidad de los materiales. La caracterización reológica de los asfaltos en el reómetro de corte dinámico (DSR por sus siglas en inglés) evalúa al material en la región viscoelástica lineal, tanto para los parámetros de ahuellamiento como de fatiga en los lineamientos planteados por SHRP. En particular, el daño a fatiga que sufren los pavimentos asfálticos está fuertemente influenciado por la naturaleza del betún asfáltico que lo componga, dicho fallo se produce fuera de la zona viscoelástica lineal. Debido a esto, los métodos tradicionales propuestos por SUPERPAVE, como  $G^*\sin\delta$  no evalúan completamente este problema, ya que el análisis realizado está ausente de variaciones de esfuerzos de deformación, que se traducen a solo un estado de carga evaluado en el reómetro [5, 6, 7].

En función de estas limitaciones, el ensayo de barrido de tiempo en el reómetro de corte dinámico resulta una forma más precisa de cuantificar la fatiga en el ligante asfáltico. Esta metodología contempla la evaluación del módulo complejo de la muestra a una frecuencia, amplitud y temperatura definida. El criterio de falla del material de acuerdo a este ensayo se propone como criterio general cuando el módulo complejo decae al 50 % del módulo inicial. Repitiendo el procedimiento a distintas amplitudes, se establece la relación entre la deformación impuesta y los ciclos a la falla del material, que es representado por la Ecuación 1

$$N_f = A(\gamma_{max})^B \quad (1)$$

Donde  $N_f$  es el número de ciclos a la falla,  $\gamma_{max}$  la deformación específica de corte,  $A$  y  $B$  los parámetros de ajuste del modelo que dependen del material. Este esquema de ensayo y modelo de representación es el que se utiliza frecuentemente para evaluar la fatiga en mezclas asfálticas por medio de la viga de cuatro puntos.

Sin embargo, a pesar de ser una propuesta superadora a la metodología de falla a fatiga en asfaltos propuesta por SUPERPAVE, el ensayo de barrido de tiempo en el DSR implica grandes tiempos de ensayo de material a evaluar, en función de la deformación aplicada a la muestra [2]. Por otra parte, implica un ensayo por cada punto de deformación específica aplicada, resultando en una gran cantidad de muestras para poder conformar la curva de falla presentada anteriormente. A su vez, la reducción al 50 % del módulo inicial como criterio de falla del material, resulta arbitraria ya que aún queda poco menos de la mitad de la vida útil del material para poder ser utilizada [3].

## 2.1 Barrido de amplitud lineal (Linear Amplitude Sweep - LAS)

En los últimos años, en busca de una alternativa a las metodologías antes descritas, se propone el ensayo de barrido de amplitud lineal para evaluar la fatiga en los cementos asfálticos. Este método considera evaluar la muestra con un esfuerzo de deformación creciente para simular el estado de solicitaciones que se generan en un pavimento.

Los resultados del barrido de amplitud lineal, resultan aplicables a la Teoría Simplificada del Daño Continuo Viscoelástico (S-VECD, por sus siglas en inglés), [5, 6, 8] la cual modela el trabajo interno del material y cuantifica el daño por medio de los cambios microestructurales de la muestra [9, 10]. En función del estudio realizado por Schapery y Park [11] se arriba a la ley de acumulación de daño, representada por la Ecuación 2

$$\frac{dS}{dt} = \left( -\frac{\partial W^R}{\partial S} \right)^\alpha \quad (2)$$

En donde  $S$  es el crecimiento del daño en la muestra,  $W$  el trabajo realizado,  $t$  el tiempo, y  $\alpha$  el parámetro de integridad de la muestra. Dicha teoría es aplicada recientemente a estudios para predecir la fatiga tanto en asfaltos como en mezclas asfálticas [4, 9].

El parámetro de integridad de la muestra  $\alpha$  previamente se estimaba a partir de la curva de módulo de relajación ( $G^*(t)$ ) en función del tiempo. Para su obtención, se tiene que realizar una conversión del módulo  $G^*$  desde el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo. Esta conversión no es utilizada con regularidad por la complejidad que implica su aplicación. Para simplificar la obtención de  $\alpha$ , es posible cuantificarlo mediante la pendiente del ensayo de barrido de frecuencia, en el cual se considera a la muestra sin daño [5]. Finalmente queda expresado como  $\alpha=1/m$ , siendo  $m$  la pendiente del ensayo de barrido de frecuencia, con el cual se caracteriza la muestra sin daño. Por otra parte, el trabajo realizado por la muestra se puede modelizar según la Ecuación 3

$$W = \pi(\gamma_0)^2 G^* \text{sen} \delta \quad (3)$$

Donde  $W$  es el trabajo realizado expresado como energía disipada,  $\gamma_0$  la deformación específica de corte aplicada,  $G^*$  el modulo complejo de corte y  $\delta$  el ángulo de fase. De esta forma se puede integrar en forma numérica la Ecuación 2 utilizando la Ecuación 3 para poder llegar a la expresión para el crecimiento del daño, mostrada en la ecuación 4

$$S = \sum_{j=1}^N [\pi(\gamma_0)^2 (C_{j-1} - C_j)]^{(\alpha/(1+\alpha))} [(t_j - t_{j-1})]^{(1/(1+\alpha))} \quad (4)$$

Donde  $C_j$  es la relación entre el modulo en cada punto y el modulo inicial del material sin daño,  $\gamma_0$  es la deformación de corte aplicada, y  $t$  el tiempo.

Para cuantificar el daño que presentan las muestras durante el ensayo, se grafican las curvas de daño C-S, las cuales representan la integridad de la muestra en función del daño acumulado. Dicha curva puede ser ajustada por medio de la Ecuación 5

$$C = C_0 - C_1(S)^{C_2} \quad (5)$$

Donde  $C_0=1$  y  $C_1$  y  $C_2$  son los coeficientes de ajuste del modelo. Derivando la Ecuación 5 y substituyéndola en la Ecuación 2, se puede finalmente llegar a la Ecuación 1, que en su forma extendida se presenta como la Ecuación 6.

$$N_f = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi C_1 C_2)} (\gamma)^B \quad (6)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de ensayo (definida en 10 Hz),  $D_f$  el criterio de falla adoptado,  $k = 1 + (1 - C_2) \alpha$ , y  $B = -2\alpha$ . En función del estudio realizado por Masad [12], se considera que la deformación específica aportada por el asfalto representa entre 12 y 90 veces la deformación específica de la mezcla asfáltica. Finalmente, Bahía fija dicho parámetro en 50 veces y propone una deformación específica de corte de 2,5 % para pavimentos mayores a 10 cm y 5,0 % para pavimentos menores a 10 cm [13, 14, 15].

Varios autores proponen distintos criterios de falla  $D_f$  [1, 2, 7, 9, 16] para definir el límite de fatiga de los asfaltos contemplando este ensayo. El presente trabajo propone considerar los dos criterios más utilizados para obtener las curvas de ejes equivalentes resultante. En primer lugar, la caída del valor de la curva C-S un 35 % del valor inicial, dato que unifica la posición para los ligantes evaluados. El segundo, corresponde al valor del pico del esfuerzo de corte ejercido en la muestra evaluado en la curva C-S [15].

### 3 Materiales y métodos

Para el estudio se utiliza un cemento asfáltico clasificado por viscosidad como CA-30 y polvo de neumático fuera de uso (NFU) como modificador del asfalto. El NFU se adiciona al asfalto en porcentajes de 15 %, 20 % y 25 %. La modificación de los asfaltos se realiza en un dispersor de altas revoluciones durante una hora para obtener una muestra homogénea. El asfalto base y los asfaltos modificados con NFU se someten a la estufa de película delgada (RTFO, de su sigla en inglés) para simular las condiciones de envejecimiento a corto plazo que se producen en el asfalto. Los asfaltos se caracterizan mediante los ensayos de viscosidad rotacional, recuperación elástica torsional y punto de ablandamiento previo, y posterior a envejecer las muestras.

Para la caracterización a fatiga de los asfaltos por medio del ensayo LAS, se utiliza un DSR de la marca Discovery HR-2 Hybrid Rheometer de TA Instrumenst. El mismo cuenta con una cámara de ensayo ambientada (ETC, de sus siglas en inglés para Environmental Test Chamber) como se muestra en la Figura 1. Para llevar a cabo el ensayo, se utiliza la geometría de platos paralelos con 8 mm de diámetro, con una separación de 2 mm entre ellos.



Figura 1. Reómetro de corte utilizado (izq.) geometría de 8 mm junto con la muestra a evaluar (der.)

El ensayo de LAS se encuentra regulado por la norma AASHTO 101-14 [17, 18] para caracterizar el daño por fatiga en el asfalto. Sin embargo, hasta la actualidad no hay ninguna especificación de clasificación de asfaltos que haya incorporado esta evaluación [19], como si se encuentra presente el ensayo de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) para la evaluación del ahuellamiento en los betunes asfálticos.

La metodología contempla dos etapas dentro del propio ensayo. La primera consiste en caracterizar la muestra mediante un barrido de frecuencias en el rango de 0,2 a 30 Hz a una deformación específica de corte de 0,1 %. Esta etapa se utiliza para caracterizar al material sin daño. La segunda parte radica en someter a la muestra a un estado de deformaciones crecientes. Esta etapa se lleva a cabo a una frecuencia de 10 Hz y a un incremento constante de deformaciones específicas de 0,1 % a 30 %. En cada ciclo de carga, se registra el esfuerzo pico asociada a la deformación impuesta, junto con el ángulo de fase resultante. El procedimiento estandarizado propone el aumento de deformaciones en un tiempo de 310 segundos, encontrándose en la bibliografía alternativas para este tiempo de carga. La temperatura de ensayo en la cual se evalúan las muestras es de 20 °C, 25 °C y 30 °C.

Con los datos recopilados de los ensayos, se procede a trazar las curvas C-S para cada uno de los asfaltos estudiados y para cada temperatura de ensayo. Posteriormente, se evalúan las curvas

de vida a fatiga a las temperaturas consideradas y, por último, se realiza una comparación entre los dos criterios de falla enunciados para los asfaltos evaluados a 20 °C.

## 4 Resultados y discusión

### 4.1 Curvas C-S de daño

Los ligantes asfálticos utilizados son un asfalto convencional clasificado por viscosidad (CA-30) y tres ligantes modificados a partir del asfalto base con crecientes tasas de caucho proveniente de NFU (15%NFU, 20%NFU y 25%NFU). En la Tabla 1 se pueden apreciar las propiedades de los asfaltos utilizados.

Tabla 1. Caracterización de los asfaltos utilizados

Ensayo	CA-30	15%NFU	20%NFU	25%NFU
P. A. Original (°C)	53	59	62	68
RET (%)	-	47,8	63,3	68,9
Penetración (1/mm)				
P. A. RTFO (°C)	58	64	67	71
Visc. Brookfield [135° 0,9 RPM S21] (cP)	-	4111	7611	16777
Visc. Brookfield [170° 0,9 RPM S21] (cP)	-	575	804	2617

Luego de envejecer los asfaltos dentro de la estufa RTFO, se procede a realizar el ensayo LAS en el DSR. Mediante el análisis realizado previamente se calculan los parámetros del modelo según la S-VECD para evaluar el coeficiente  $\alpha$  de integridad del material y los coeficientes C1 y C2 de la curva de daño. A continuación se pueden apreciar en la Tabla 2 los ensayos a 20 °C, 25 °C y 30 °C.

Tabla 2. Parámetros del modelo para los asfaltos evaluados.

Temp.	Muestra	$\alpha$	C1	C2
20 °C	CA-30	1,488	0,059	0,513
	15%NFU	1,596	0,077	0,422
	20%NFU	1,622	0,073	0,425
	25%NFU	1,700	0,076	0,409
25 °C	CA-30	1,301	0,049	0,532
	15%NFU	1,459	0,057	0,463
	20%NFU	1,512	0,066	0,425
	25%NFU	1,625	0,060	0,434
30 °C	CA-30	1,143	0,020	0,680
	15%NFU	1,400	0,041	0,509
	20%NFU	1,489	0,045	0,468
	25%NFU	1,577	0,043	0,470

Con los parámetros de ajuste encontrados se grafican las curvas C-S de integridad del material en función del daño acumulado. En las Figuras 2, 3 y 4 se ven las curvas para 20 °C, 25 °C y 30 °C respectivamente. Para las tres temperaturas se puede apreciar en las gráficas que los asfaltos modificados con NFU mantienen una mayor integridad del material para intensidades de daño superiores a 50. De igual forma se evidencia un rendimiento superior cuando crece el porcentaje de incorporación de NFU, aunque en forma menos pronunciada. Se puede evidenciar también que los asfaltos con NFU poseen un 60% de vida del material en función del valor límite de intensidad de daño para el asfalto sin modificar, para las evaluaciones a 20 °C.

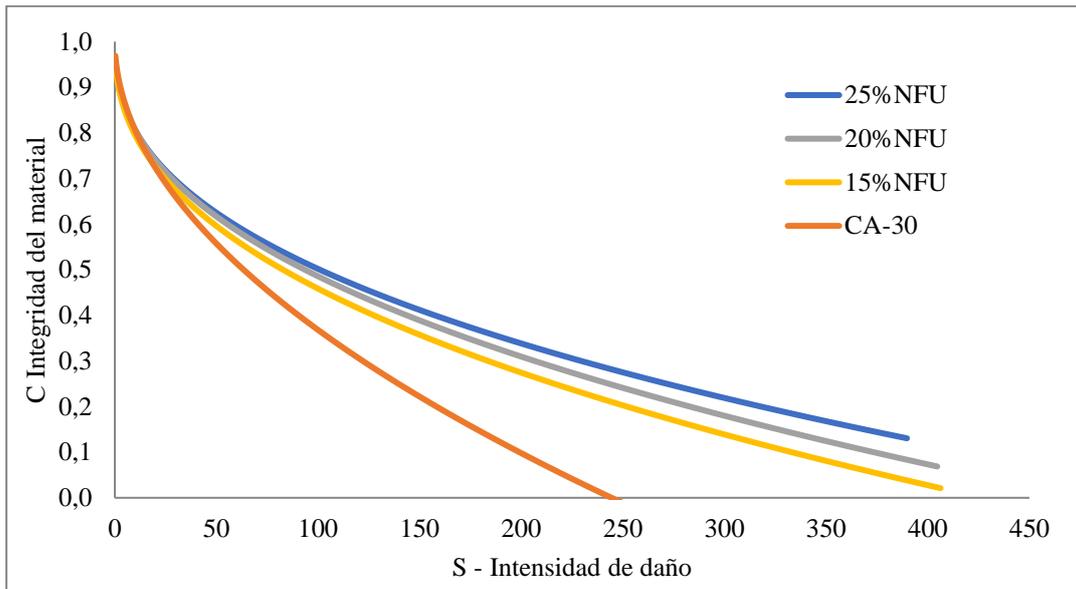


Figura 2. Curva C-S a 20 °C para los asfaltos evaluados.

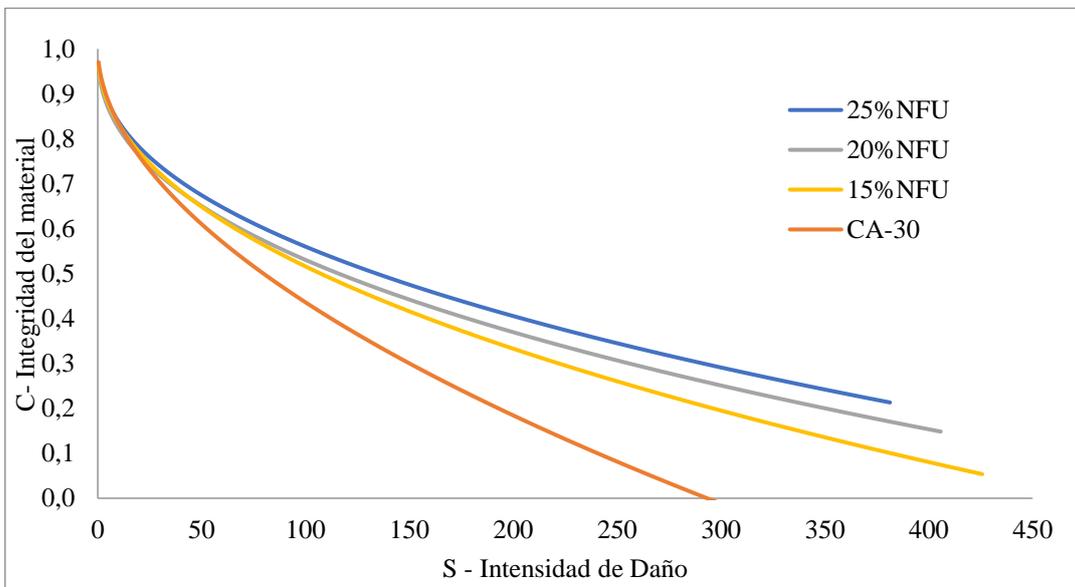


Figura 3. Curva C-S a 25 °C para los asfaltos evaluados.

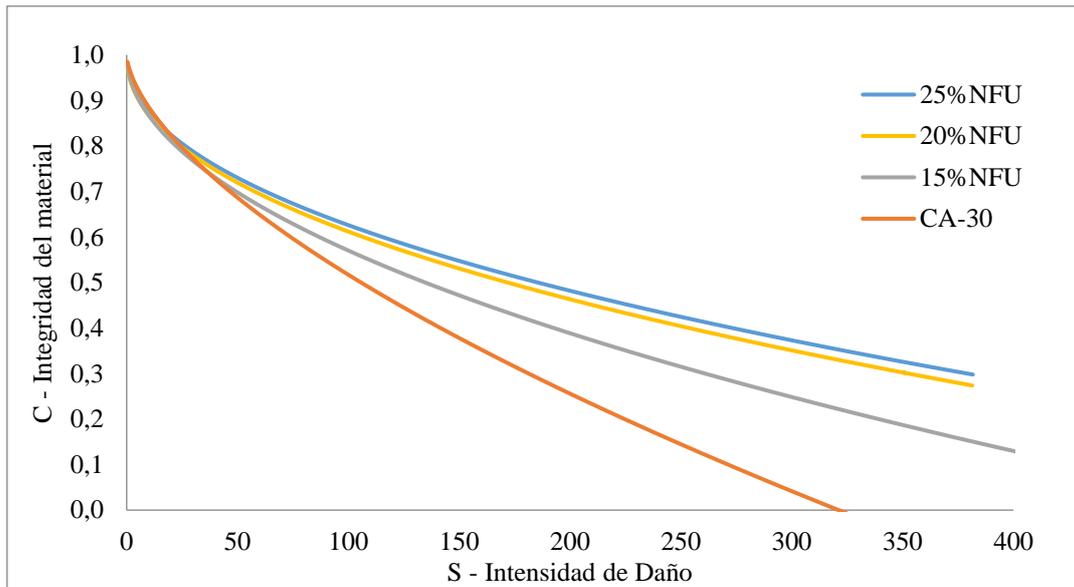


Figura 4. Curva C-S a 30 °C para los asfaltos evaluados.

#### 4.2 Curvas de vida útil a fatiga

A partir de las gráficas desarrolladas de C-S, se arman los modelos para estimar la vida a fatiga en función de la deformación específica máxima del material y del criterio de falla adoptado para su evaluación. En primera instancia se evalúan estas curvas con la reducción del 35 % de la integridad inicial para desarrollar el modelo visto en la Ecuación 1. Como se puede apreciar, en principio, para 20 °C hay un considerable beneficio de la incorporación de NFU según se ve en las Figuras 5, 6 y 7.

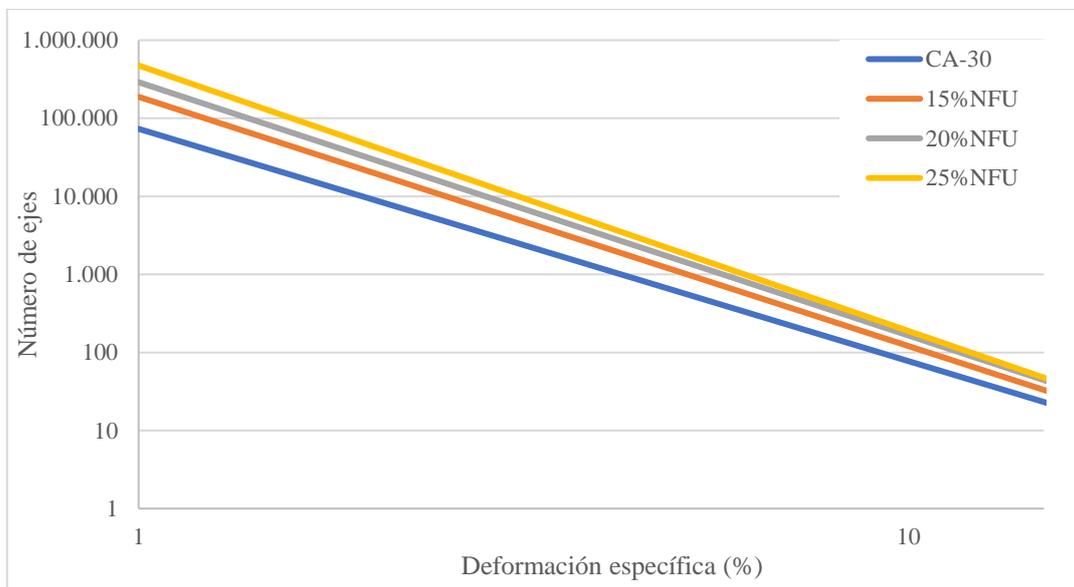


Figura 5. Vida a fatiga a 20 °C para los asfaltos evaluados con Df = 35 % de daño.

La gráfica a 25 °C sigue la misma tendencia, sin embargo se evidencia una diferencia entre las distintas proporciones de caucho incorporadas. El fenómeno de fatiga se manifiesta a temperaturas intermedias (10 °C - 30 °C aproximadamente). Por ello, a medida que se ensaye a mayor temperatura, se evidencian mejoras en el rendimiento y a su vez los materiales con mayor

grado de modificación presentan mejores desempeños. En este último gráfico se puede ver una mejora en la incorporación del 25 % en comparación a las otras alternativas.

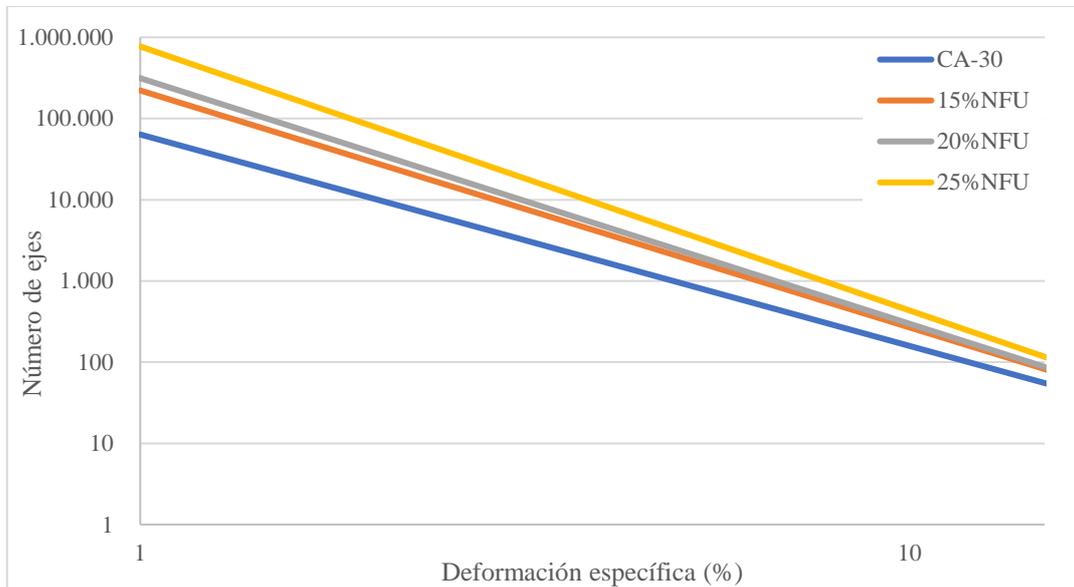


Figura 6. Vida a fatiga a 25 °C para los asfaltos evaluados con Df = 35 % de daño.

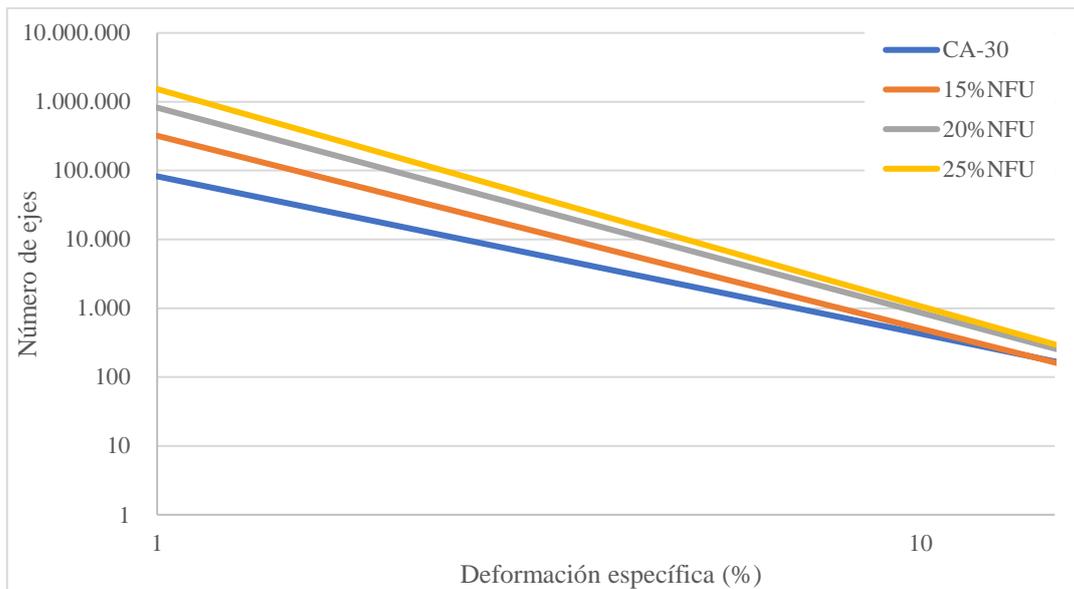


Figura 7. Vida a fatiga a 30 °C para los asfaltos evaluados con Df = 35 % de daño.

#### 4.3 Comparación entre criterios de falla contemplados.

Como se menciona previamente, a partir de los ensayos realizados, se plantea la comparación entre criterios de falla para obtener las curvas de vida a fatiga. Con las curvas ya expuestas con un criterio de falla de reducción del 35 % de la integridad inicial, se conforman las curvas de vida a fatiga con el criterio del pico máximo de esfuerzo de corte, junto con su correspondiente valor en la curva C-S. La Figura 8 muestra comparativamente los asfaltos evaluados a 20 °C y con una deformación aplicada del 2,5 %.

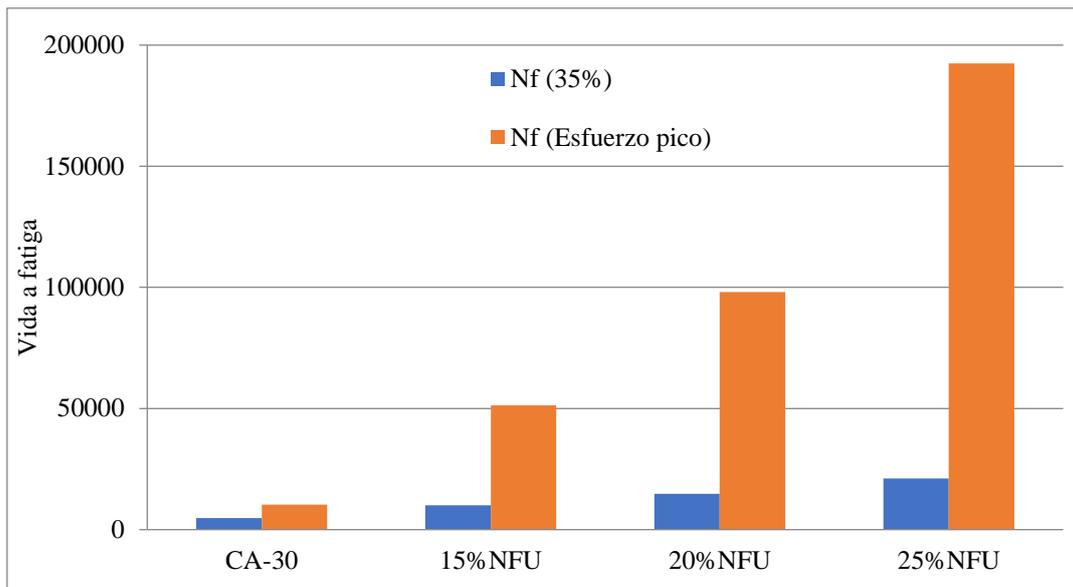


Figura 8. Vida a fatiga a 20°C para diferentes criterios de falla (2,5 % de deformación)

Como se puede apreciar, hay una significativa diferencia entre los criterios planteados, brecha que se amplía con el crecimiento de incorporación de NFU. Por otro lado, el criterio del 35 %, si bien es conservador, y no es algo menor a la hora de evaluar la fatiga en los pavimentos, es un criterio fijo para todo tipo de asfaltos. De esta forma, para los asfaltos modificados con NFU, se está subestimando la vida del material, ya que se lo considera en estado de falla, cuando la vida remanente del mismo es considerable. El criterio de reducción de un valor inicial, es equivalente al criterio de la reducción del 50 % del módulo inicial para evaluar mezclas asfálticas por medio de la viga de fatiga en cuatro puntos. Como se menciona previamente, estos criterios están siendo cuestionados por la aleatoriedad a la hora de puntualizar un punto de falla del material.

Por otra parte, si bien los datos de vida considerando el esfuerzo de corte pico son ampliamente mayores que los evaluados por el 35 % de reducción es un criterio que pone de manifiesto la variación del punto de falla del material y que sobreestima la vida útil del material.

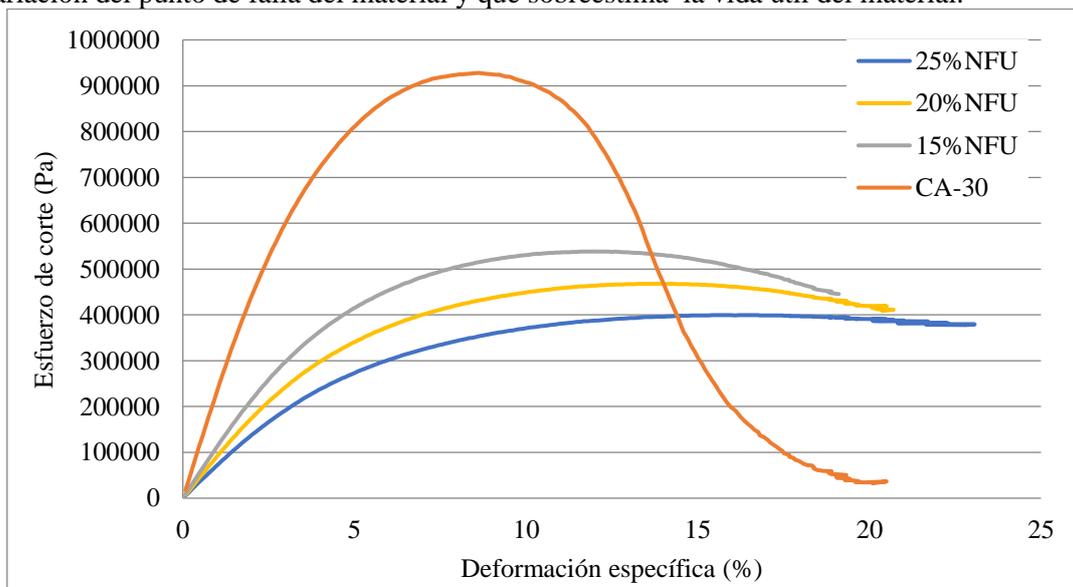


Figura 9. Esfuerzo de corte en función de la deformación específica a 20 °C

Como se puede ver en la Figura 9, a pesar de obtener un mayor esfuerzo pico, la muestra CA-30 alcanza dicho valor prematuramente y cae en forma pronunciada en comparación con los

asfaltos con NFU. Los asfaltos modificados evidencian una curva más estable a medida que se incrementa el porcentaje de NFU. Dicho efecto, se ve contemplado en las curvas C-S que evalúan el trabajo interno realizado por el material. Por otra parte, el desplazamiento de los picos de esfuerzos en las muestras, se traducen en desplazamientos grandes en las curvas C-S. Finalmente, esto repercute con un considerable efecto a la hora de evaluar el número de ejes contemplados a fatiga.

## 5 Conclusiones

En el presente trabajo se realiza la caracterización de cuatro asfaltos (uno convencional y tres modificados con contenidos crecientes de neumático fuera de uso) envejecidos en el horno de película delgada rotativa, mediante el ensayo de fatiga en reómetro de corte dinámico, conocido como barrido de amplitud lineal, a 20 °C, 25 °C y 30 °C. Dicho ensayo permite imprimir un daño considerable a las muestras, aplicando deformaciones de hasta el 30 %, llevando efectivamente a la fatiga. La metodología de ensayo, es consistente con la teoría simplificada del daño continuo viscoelástico y permite modelar las curvas C-S (Daño acumulado versus Integridad de material) y las curvas de vida a fatiga para estimar el número de ejes que es capaz de resistir el material ( $N_f$ ).

Para la confección de dichas curvas se estudiaron dos criterios de falla comúnmente utilizados. Por un lado, el daño correspondiente a una caída del 35% en la curva de daño, y por otra parte el valor de la curva de daño que resulta del pico del esfuerzo de corte durante el ensayo. Este último criterio, converge a resultados de vida a fatiga que permiten evaluar al material con un desempeño mayor al considerado por la reducción del 35% de la curva C-S.

Por otra parte, tanto a 20 °C, 25 °C y 30 °C se puede ver un marcado beneficio en la incorporación del neumático fuera de uso como un residuo modificador del asfalto, tanto en las curvas de acumulación de daño C-S como en los modelos desarrollados de vida a fatiga en función de la deformación específica. Si bien a medida que aumenta la incorporación de neumático fuera de uso se aumentan los parámetros obtenidos, la mayor evidencia entre los porcentajes de NFU se puede apreciar en los resultados de vida a fatiga cuando se considera el criterio de falla del esfuerzo pico.

## 6 Referencias

- [1] Kröger, I., Pfeiff, C., Especiales, B. A., & Nicolich, C. ENSAYOS ÁGILES EN DSR PARA ESTIMAR DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.
- [2] Saboo, N. (2020). New damage parameter for fatigue analysis of asphalt binders in linear amplitude sweep test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020126.
- [3] Wang, C., Castorena, C., Zhang, J., & Richard Kim, Y. (2015). *Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading*. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup2), 125-148.
- [4] Zhang, F., Wang, L., Li, C., & Xing, Y. (2020). Predict the phase angle master curve and study the viscoelastic properties of warm mix crumb rubber-modified asphalt mixture. *Materials*, 13(21), 5051.
- [5] Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., & Bahia, H. (2011). Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record*, 2207(1), 99-106.
- [6] Hintz, C., & Bahia, H. (2013). Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter. *Transportation Research Record*, 2370(1), 10-16.
- [7] Yue, M., Yue, J., Wang, R., & Xiong, Y. (2021). Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit® and polymers using linear amplitude sweep test. *Construction and Building Materials*, 289, 123054.
- [8] Klug, A., Ng, A., & Faxina, A. (2022). Application of the Viscoelastic Continuum Damage Theory to Study the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures—A Literature Review. *Sustainability*, 14(9), 4973
- [9] Safaei, F., Lee, J. S., Nascimento, L. A. H. D., Hintz, C., & Kim, Y. R. (2014). Implications of warm-mix asphalt on long-term oxidative ageing and fatigue performance of asphalt binders and mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 15(sup1), 45-61.

- [10] Chen, H., Zhang, Y., & Bahia, H. U. (2021). Estimating asphalt binder fatigue at multiple temperatures using a simplified pseudo-strain energy analysis approach in the LAS test. *Construction and Building Materials*, 266, 120911.
- [11] Schapery, R. A., & Park, S. W. (1999). Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II—An approximate analytical method. *International Journal of Solids and Structures*, 36(11), 1677-1699.
- [12] Masad, E., Somadevan, N., Bahia, H. U., & Kose, S. (2001). Modeling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, 127(6), 477-485.
- [13] Chen, H., Zhang, Y., & Bahia, H. U. (2021). Modelling asphalt binder fatigue at multiple temperatures using complex modulus and the LAS test. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-10.
- [14] Mandal, T., & Bahia, H. U. Effect of Crumb Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binder and Aggregate Packing of Asphalt Mixtures.
- [15] Foroutan Mirhosseini, A., Kavussi, A., Jalal Kamali, M. H., Khabiri, M. M., & Hassani, A. (2017). Evaluating fatigue behavior of asphalt binders and mixes containing Date Seed Ash. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1164-1175.
- [16] Coutinho, R., Castelo Branco, V. T. F., Babadopulos, L. F. A. L., & Soares, J. (2013). The use of linear amplitude sweep tests to characterize fatigue damage in fine aggregate matrices. In *1st Conference on Rheology and Processing of Construction Materials. At Paris, France*.
- [17] AASHTO TP101 (2014). *Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*.
- [18] AASHTO TP101 (2012). *Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep*.
- [19] Chen, H., & Bahia, H. U. (2022). Proposed asphalt binder fatigue criteria for various traffic conditions using the LAS or the GR parameters. *Materials and Structures*, 55(1), 1-12.